

**О. Е. МАРКОВ, В. М. ЗЛИГОРЕВ, О. В. ГЕРАСИМЕНКО, Л. И. АЛИЕВА, Р. Ю. ЖИТНИКОВ,
С. В. ИНЧАКОВ**

РОЗРОБКА НОВОГО СПОСОБУ ОСАДЖЕННЯ КРУПНИХ ЗЛИТКІВ

Розроблено новий спосіб осадження заготовок. Спосіб полягає в осадженні заготовок, в яких попередньо зформовано увігнуті грані. Для встановлення впливу увігнутих граней на закриття осевих дефектів була розроблена спеціальна методика експериментальних досліджень. Дослідження проводилися на свинцевих і сталевих моделях. За результатами досліджень було встановлено раціональна глибина увігнутих граней, яка становить співвідношення діаметрів виступів і уступів рівних 0,85. Це співвідношення забезпечує максимальне закриття осевого отвору. Це відбувається за рахунок високого рівня напружень що стискають при осадженні профільованих заготовок з увігнутими гранями. Визначена раціональна ступінь осадження, при якій відбувається максимальне закриття внутрішніх пустот. Закриття внутрішніх пустот було перевірено експериментальними дослідженнями. Було здійснено впровадження нового способу кування з використанням осадження заготовок з профільованими гранями. Результати ультразвукового контролю дозволили встановити, що отримані деталі відповідають вимогам європейського стандарту SEP 1921 за розмірами внутрішніх дефектів. Проведені дослідження дозволили зробити висновок про ефективність запропонованого нового способу осадження заготовок, які були попередньо профільовані з утворенням увігнутих граней.

Ключові слова: кування, злиток, увігнуті грані, осадження, напружено-деформований стан, осеві дефекти.

**О. Е. МАРКОВ, В. Н. ЗЛЫГОРЕВ, А. В. ГЕРАСИМЕНКО, Л. И. АЛИЕВА, Р. Ю. ЖИТНИКОВ,
Е. В. ИНЧАКОВ**

РАЗРАБОТКА НОВОГО СПОСОБА ОСАДКИ КРУПНЫХ СЛИТКОВ

Разработан новый способ осадки заготовок. Способ заключается в осадке заготовок, в которых предварительно сформированы вогнутые грани. Для того, чтобы установить влияние вогнутых граней на закрытие осевых дефектов была разработана специальная методика экспериментальных исследований. Исследования проводились на свинцовых и стальных моделях. По результатам исследований была установлена рациональная глубина вогнутых граней, которая составляет соотношение диаметров выступов и уступов равных 0,85. Это соотношение обеспечивает максимальное закрытие осевого отверстия. Это происходит за счет возникновения высокого уровня сжимающих напряжений при осадке спрофилированных заготовок с вогнутыми гранями. Определена рациональная степень осадки, при которой происходит максимальное закрытие внутренних пустот. Закрытие внутренних пустот было проверено экспериментальными исследованиями. Было произведено внедрение нового способаковки с использованием осадки заготовок с вогнутыми гранями. Результаты ультразвукового контроля позволили установить, что полученные детали соответствуют требованиям европейского стандарта SEP 1921 по размерам внутренних дефектов. Проведенные исследования позволили сделать вывод о эффективности предлагаемого нового способа осадки заготовок, которые были предварительно спрофилированы с образованием вогнутых граней.

Ключевые слова: ковка, слиток, вогнутые грани, осадка, напряженно-деформированное состояние, осевые дефекты.

O. E. MARKOV, V. N. ZLYGORIEV, O. V. GERASIMENKO, L. I. ALIEVA, R. U. ZHYTNIKOV, Y. V. INCHAKOV

DEVELOPMENT OF UPSETTING NEW METHOD FOR LARGE INGOTS

A forging method for blanks, which implies the upsetting of workpieces with concave faces, has been proposed. A technique of the experimental research to verify the obtained results has been developed. The study using the lead and steel workpieces was performed. The results of the study allowed to establish that the effective depth of the concave faces is the ratio of diameters of protrusions and ledges equal to 0.85. At this ratio there occurs the intensive closure of an axial defect. This is due to the high level of compressive stresses during upsetting of the workpieces with concave faces. It has been established the effective degree of deformation at which the intensive closure of defects takes place. The closure of axial defects has been confirmed by experimental study using lead and steel samples. The new method for upsetting workpieces with concave faces has been implemented. The results of ultrasonic testing have allowed to establish that the obtained forged blanks do not have internal defects, which exceed the requirements of the European standard SEP 1921. The research has led to conclude of the high efficiency of the proposed new method for upsetting workpieces with concave faces, which implies the improvement of the axial zone quality of large forgings when using a given technique.

Keywords: forging, ingot, concave facets, upsetting, stressed-deformed state, axial defects.

Вступ. Великовантажні поковки у важкому машинобудуванні відносяться до виробів до яких висуваються жорсткі вимоги щодо якості внутрішньої будови металу. Такі поковки виготовляються куванням. Заготовками для кування крупних поковок є ковальські злитки. Злитки мають низьку щільність металу в осевій зоні (осьова рихлість), що викликана умовами кристалізації. Більш того, ковальські злитки мають крупнозернисту будову, яка має низьку ударною в'язкістю. Тому для гарантованого подрібнення дендритної структури металу, а також заковування осевих дефектів злитка деталі для важкого машинобудування повинні виготовлятися з високим коефіцієнтом уковування (2,5...3,0). Такий коефіцієнт уковування можна забезпечити тільки із використанням додаткової операції осадження. Але в

останніх дослідженнях вітчизняних і зарубіжних вчених показано, що операція осадження крупних злитків не гарантує закриття внутрішніх дефектів поковок, які виготовлені зі злитків. Так наприклад, У роботі [1] встановлено, що існуючі технологічні процеси кування крупних поковок не забезпечують одержання стабільної високої якості. Тому для підвищення якості крупних поковок слід розробляти нові способи деформування, які б сприяли заварюванню внутрішніх дефектів злитків.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Дослідження, що представлені у роботі [2] дозволили встановити, що для усунення осевої рихлості ковальського злитка доцільно перед осадженням призначити додаткову операцію – протягування. Автори ввели показник, що кількісно

оцінює ступінь закриття внутрішніх дефектів у процесі протягування та осадження, який враховує напружений стан заготовки у процесі деформування. У роботі представлено, що осадження без протягування не сприяє зменшенню розмірів осьових дефектів. Однак автори не досліджували вплив форми деформувального інструменту на нерівномірність проробки литої структури металу заготовки, яка впливає на анізотропію механічних властивостей поковки.

Авторами роботи [3] встановлено, що коефіцієнт уковування є базовим показником, який описує подрібнення литої структури злитка та її подальші механічні властивості. Однак оцінювати технологічні процеси кування доцільно на основі даних розподілу деформацій за перерізом заготовки, що не було зроблено в даній роботі.

У роботі [4] було визначено, що в процесі осадження відбувається розширення ліквідаційної зони злитка, що може бути причиною зниження якості деталі. Однак у роботі не встановлено вплив використання профілювання злитка на зміну напружено-деформованого стану (НДС) у процесі осадження.

Дослідження [5; 6] дозволили встановити, що операція осадження використовується для проробки структури металу задля підвищення показників ударної в'язкості та зменшення анізотропії механічних властивостей. Однак отримані у роботі результати підтвердили підвищення нерівномірності деформацій у тілі заготовки після осадження. У роботі не запропоновано операцій та інструменту, які б сприяли зниженню нерівномірності розподілу деформацій, що є базовим показником підвищення якості великотоннажних деталей.

У роботі [7; 8] встановлено, що осадження використовується як операція для збільшення коефіцієнту уковування та не сприяє підвищенню проробки внутрішньої будови металу. Авторами роботи не досліджені нові способи протягування для виключення осадження.

Комбінування операцій осадження та протягування сприяє зниженню нерівномірності розподілу деформацій у тілі заготовки, у порівнянні з процесом протягування вирізними бойками [9]. Це додатково свідчить про ефективність застосування операції осадження з попереднім протягуванням. Однак у роботі не досліджувався НДС після осадження профілюваних заготовок, що додатково підвищить ефективність поєднання операцій протягування й осадження.

При розробці нових техпроцесів кування поковок зі злитків необхідно знати НДС заготовки й енергосилові параметри у процесі деформування [10]. На теперішній час у теорії обробки металів тиском використовується ряд методів для встановлення НДС, формоутворення й силових параметрів кування [11]. На НДС у тілі заготовки у процесі гарячого деформування основний вплив оказує розподіл температур в об'ємі поковки. У зв'язку з цим слід застосовувати сучасні методи дослідження

формоутворення, які б дозволяли враховувати вплив температур на НДС металу поковки.

Сучасним теоретичним методом дослідження процесів обробки тиском є метод скінчених елементів (МСЕ) [12]. Цей метод використовують для встановлення теплового та НДС металу поковки. Удосконалення технологічних процесів кування не можливе без використання МСЕ [13]. Тому дослідження процесів кування злитків доцільно проводити МСЕ.

Дослідження процесів кування великотоннажних поковок це складний процес, що пояснюється розмірами заготовок і витратами на їх виробництво. Це вимагає проведення комплексних теоретичних й експериментальних досліджень перед апробацією нового способу кування у виробничих умовах. Для проведення таких досліджень доцільно використовувати методи, що дозволяють із достатньою точністю моделювати процеси кування. До таких методів відноситься МСЕ, який зарекомендував себе як точний інструмент для проведення досліджень і дозволяє одержувати результати з високим ступенем вірогідності [14 – 19].

Мета роботи – підвищення якості великотоннажних поковок за рахунок заковування внутрішніх дефектів злитків на основі застосування нового способу осадження заготовок з увігнутими гранями.

Для досягнення зазначеної мети у роботі поставлені наступні завдання:

- розробити методику проведення експериментальних досліджень профілювання і осадження заготовок;
- встановити вплив форми заготовок з увігнутими гранями на заковування осьових дефектів у процесі осадження, що дозволить встановити раціональний спосіб профілювання та осадження;
- провести перевірку отриманих теоретичних результатів експериментальними дослідженнями зміни розмірів осьових дефектів при профілюванні й осадженні заготовок з увігнутими гранями;
- провести проміслову апробацію нових технологічних процесів із застосуванням осадження заготовок з увігнутими гранями.

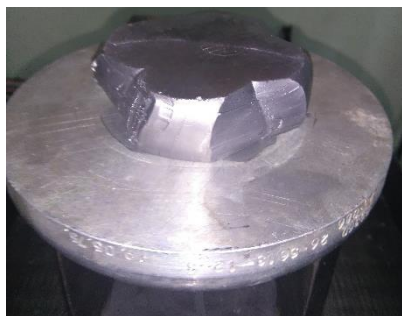
Методика експериментальних досліджень. Для дослідження механізму заковування внутрішнього дефекту була розроблена методика неруйнівного контролю виміру розмірів осьового дефекту у процесі деформування для оцінки впливу процесу профілювання та осадження заготовок з увігнутими гранями на закриття внутрішніх дефектів. Методика полягала у виготовленні зразків з осьовим отвором діаметром 10 % від діаметра заготовки. Получений таким чином штучний дефект з'єднувався за допомогою резинового шлангу з лабораторним волюметром.

Отримана система заповнювалася водою. Зміна об'єму дефекту у процесі деформування заготовки призводить до зміни рівня рідини у волюметрі. За об'ємом витиснутої рідини й поточній висоті заготовки визначався середній діаметр дефекту [19].

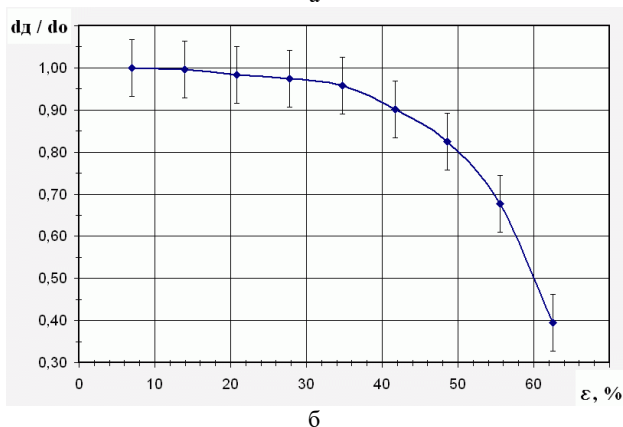
Діаметр свинцевих заготовок – 50 мм, діаметр отвору – 5 мм. Циліндричні заготовки попередньо деформувалися випуклими бойками з кутом 120° для формування увігнутих граней. Деформація при профілюванні заготовки становила 15; 20 і 25 %, що відповідала глибині увігнутих граней (d/D) 0,75; 0,80; 0,85.

Перевірка результатів механізму заковування дефекту на свинцевих зразках проводилась експериментом на моделях зі сталі 40ХН. Осьова рихлість злитка моделювалася отвором діаметром 4 мм. Зразки нагрівалися в електричній печі до температури 1200°C та деформувалися випуклими бойками, після чого проводилося осадження отриманих заготовок плоскими плитами.

Закриття осьових дефектів у свинцевих заготовках. Заготовка після осадження з приєднаним гнучким шлангом для фіксування витиснення рідини представлена на рисунку 1, а. Результати дослідження ступеня закриття осьових дефектів у процесі осадження свинцевих заготовок різним глибинами увігнутих граней, представлені на рисунку 1, б.



а



б

Рис. 1 – Процесі осадження заготовки з увігнутими гранями: а – заготовка; б – зміна розмірів осьового дефекту

Кут увігнутих граней 120° сприяє заковуванню осьового дефекту в процесі осадження (див. рис. 1, б). Це пояснюється підвищенням рівня стискаючих напружень у центральній зоні заготовки при осадженні заготовок з увігнутими гранями. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що інтенсивне закриття осьового дефекту в процесі осадження заготовок з увігнутими гранями відбувається при деформації ϵ більш 25 % (див. рис. 1, б). Після осадження на 60 % середній діаметр дефекту зменшується на 65 % (див. рис. 1, б).

Закриття осьових дефектів у сталевих заготовках. Отримані результати по формозміні й закриттю осьових дефектів на свинцевих моделях перевірялися дослідженнями на сталевих зразках. Після нагрівання заготовок до температури 1200° проводилося їх профілювання випуклими бойками з кутом 120° з сумарним обтисненням за два проходи, яке дорівнювало 20 %. Після профілювання проводилося їх осадження на 50 % (див. рис. 2, а). Після осадження й охолодження проводилося розрізання заготовок для вимірювання осьового дефекту (рис. 2, б).



а



б

Рис. 2 – Деформування сталевих заготовок: а – технологічний процес; б – форма осьового дефекту після осадження на 50 % заготовки з увігнутими гранями

Після шліфування й полірування площини зрізу проводилось дослідження слідів осьового дефекту після осадження. Осадження заготовок з увігнутими гранями з кутом 120° зі ступенем обтиснення 20 % дозволило встановити ступінь заковування осьового отвору (див. рис. 2, б). Отримані результати дозволили встановити, що для досліджуваної схеми після осадження відбувається часткове закриття осьового дефекту, які були деформовані бойками з кутом 120° (див. рис. 2, б).

Промислове впровадження процесу осадження заготовок з увігнутими гранями. Відмінність нового технологічного процесу від базового полягає у застосуванні операції профілювання злитка випуклим бойком на нижній плоскій плиті з обтисненням 150 мм (20 %) для одержання заготовки з увігнутими гранями. Після осадження плоскими плитами (рис. 3), заготовка має переріз, близький до квадратного, зі стороною ≈ 1850 мм (ступінь деформації $\epsilon \approx 50$ %). Після осадження на бічній поверхні заготовки відсутня бочкоподібність, що свідчить про зміну НДС та сприяє підвищенню рівня стискаючих напружень на бічній поверхні та в осьовій зоні заготовки. У результаті відсутнє тріщиноутворення на бічній поверхні в процесі осадження. Подальші операції аналогічні базовому технологічному процесу. Для нового технологічного процесу була знижена величина коефіцієнта уковування (базового показника якості майбутньої поковки й витрат на кування) з 2,28 до 1,96. Отримані поковки проходили випробування ультразвуковим контролем (УЗК).

Згідно з висновками УЗК виявлене скупчення дефектів з еквівалентним діаметром до 3,0 мм. В основній частині поковки внутрішніх дефектів з еквівалентним діаметром більш 2,0 мм не виявлено. Результати УЗК другої поковки, що виготовлена за тією ж технологією, мають аналогічні результати. В осьовій зоні поковки виявляються одиночні дефекти з еквівалентним діаметром менше 4,0 ... 6,0 мм, що

набагато менше допустимих за розмірами дефектів, заявлених замовником.



Рис. 3 – Осадження заготовки вагою 30 тон

Обговорення результатів досліджень. У результаті експериментальних досліджень вперше встановлено, що інтенсивне закриття осевого дефекту в процесі осадження заготовок з увігнутими гранями відбувається при деформації більш 25 % (див. рис. 1, б). Отримана закономірність дозволила встановити, що після осадження на 60 % середній діаметр дефекту зменшується на 65 %. (див. рис. 1, б). Після осадження на бічній поверхні заготовки відсутня бочкоподібність, що свідчить про зміну НДС і підвищення рівня стискаючих напружень. У результаті відсутнє тріщиноутворення на бічній поверхні в процесі осадження.

Отримані результати УЗК підтверджують високу ефективність схеми осадження заготовки з увігнутими гранями на заковування осевих дефектів злитка. При цьому величина коефіцієнта укову менше, чим у способі кування по базовому варіанту. Таким чином, результати УЗК на натурних поковках підтверджують результати досліджень впливу увігнутих граней на підвищення якості крупних поковок.

Таким чином, обрана концепція підвищення якості крупних поковок за рахунок осадження заготовок з увігнутими гранями була підтверджена. Однак результати досліджень дозволили встановити, що для заготовок з кутом увігнутих граней 120° не відбувається повного закриття осевого дефекту. Тому надалі потрібно проводити додаткові дослідження для встановлення впливу кута увігнутих граней на механізм закриття осевих дефектів.

Висновки. Встановлено, що закриття дефектів починається після осадження заготовок з увігнутими гранями на 25 %. Рекомендований ступінь деформації, при якому буде відбуватися заковування осевих дефектів, становить не менш 50 %. Після осадження на 60 % середній діаметр дефекту зменшується на 65 %.

Були спроектовані й впроваджені нові технологічні процеси кування великогабаритних поковок із застосуванням осадження заготовок з увігнутими гранями. Отримані поковки відповідали технічним умовам замовника. Результати УЗК підтверджують високу ефективність схеми осадження заготовки з увігнутими гранями на заковування й заварювання осевих дефектів злитка. Увігнуті грані

заготовки підвищують рівень стискаючих напружень в осевій зоні у процесі осадження.

Список літератури

1. Dobrzański, L. A. Influence of hot-working conditions on a structure of high-manganese austenitic steels / L. A. Dobrzański, A. Grajcar, W. Borek // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2008. – 29(2). – P. 139–142. URL: http://jamme.acmsse.h2.pl/papers_vol29_2/2924.pdf
2. Development of forging process design to close internal voids / H. Kakimoto, T. Arikawa, Y. Takahashi, T. Tanaka, Y. Imaida // *J Mater Process Tech.* – 2010. – 210(3). – P. 415–422. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.09.022>.
3. Strain function analysis method for void closure in the forging process of large sized steel ingot / Kun Chen, Yitao Yang, Guangjie Shao, Kejia Liu // *Computational Materials Science*. – 2012. – 51(1). – P. 72–77. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.07.011>.
4. Internal void closure during the forging of large cast ingots using a simulation approach / Lee Y. S., Lee S. U., Van Tyne C. J., Joo B. D., Moon Y. H. // *J Mater Process Tech.* – 2011. – 211(6). – P. 1136–1145. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.01.017>.
5. Baoguang, S. A novel technique for reducing macrosegregation in heavy steel ingots / S. Baoguang, K. Xiuhong, L. Dianzhong // *J. Materials Processing Technology*. – 2010. – № 210. – P. 703–711. URL: [doi:10.1016/j.jmatprotec.2009.12.010](http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.12.010).
6. Physical modeling of the upsetting process in open-die press forging / E. Erman, N. M. Medei, A. R. Roesch, D. C. Shah // *J. Mech. Working Tech.* – 1989. – № 19. – P. 195–210. URL: [doi:10.1016/0378-3804\(89\)90004-1](http://dx.doi.org/10.1016/0378-3804(89)90004-1).
7. Kitamura, K. Determination of local properties of plastic anisotropy in thick plate by small-cube compression test for precise simulation of plate forging / K. Kitamura, M. Terano // *CIRP Ann – Manuf Techn.* – 2014. – 63(1). – P. 293–296. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.038>.
8. Mitani, Y. Analysis of rotor shaft forging by rigid-plastic finite element method / Y. Mitani, V. Mendoza, K. Osakada // *J. Mater. Process. Technol.* – 1991. – № 27. – P. 137–149. URL: [doi:10.1016/0924-0136\(91\)90049-K](http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136(91)90049-K).
9. Simulation of 42CrMo steel billet upsetting and its defects analyses during forming process based on the software DEFORM-3D / Z. J. Zhang, G. Z. Dai, S. N. Wu, L. X. Dong, L. L. Liu // *Materials Science and Engineering: A*. – 2009. – 499 (1–2). – P. 49–52. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2007.11.135>.
10. Vafaeseefat, A. Finite Element Simulation for Blank Shape Optimization in Sheet Metal Forming / Vafaeseefat A. // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2011. – 1. – P. 93–98. URL: <http://doi.org/10.1080/10426914.2010.498072>
11. Thermal-Elastic-Plastic Simulation of Internal Stress Field of Quenched Steel 40Cr Cylindrical Specimens by FEM / L. Liu, B. Liao, Q. Li, Y. Wang, Q. Yang // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2011. – 5. – P. 732–739. URL: <http://doi.org/10.1080/10426910903367428>
12. Numerical and experimental investigations on the extension of friction and heat transfer models for an improved simulation of hot forging processes / B. A. Behrens, M. Alasti, A. Bouguecha, T. Hadifi, J. Mielke, F. Schäfer // *International Journal of Material Forming*. – 2009. – Vol. 2. – P. 121–124. URL: DOI: 10.1007/s12289-009-0618-2.
13. Just, H. Blick in das Innere eines Freiformschmiede-prozesses / Hendrik Just // *Stahl und Eisen*. – 2006. – № 12. – P. 70–72.
14. Zhibankov, I. G. Rational parameters of profiled workpieces for an upsetting process / I. G. Zhibankov, O. E. Markov, A. V. Perig // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 72, Issue 5–8. – P. 865–872. URL: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00170-014-5727-5>.
15. Markov, O. E. Forging of Large Pieces by Tapered Faces / O. E. Markov // *Steel in Translation*. – 2012. – 42 (12). – P. 808–810. URL: <http://dx.doi.org/10.3103/S09677091212120054>.
16. Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation / O. E. Markov, A. V. Perig, M. A. Markova, V. N. Zlygoriev // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – 83(9–12): 2159–2174. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-8217-5>
17. A new process for forging shafts with convex dies. Research into the stressed state / O. E. Markov, A. V. Perig, V. N. Zlygoriev,

- M. A. Markova, A. G. Grin // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* – 2017. 90: 801–818. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-9378-6>
18. Development of forging processes using intermediate workpiece profiling before drawing: research into strained state / O. E. Markov, A. V. Perig, V. N. Zlygoriev, M. A. Markova, M. S. Kosilov // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* – 2017. 39(4):1-17. URL: <https://doi.org/10.1007/S40430-017-0812-Y>
 19. Markov, O. E., Development of Energy-saving Technological Process of Shafts Forging Weighting More Than 100 Tons without Ingot Upsetting / O. E. Markov, M. V. Oleshko, V. I. Mishina // *Metalurgical and Mining Industry* – 2011. 3(7): 87–90. URL: <http://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/87Markov.pdf>
- References (transliterated)**
1. Dobrzański, L. A., Grajcar, A., Borek, W. (2008). Influence of hot-working conditions on a structure of high-manganese austenitic steels. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 29 (2), 139–142. Available at: http://jamme.acmsse.h2.pl/papers_vol29_2/2924.pdf
 2. Kakimoto, H., Arikawa, T., Takahashi, Y., Tanaka, T., Imaida, Y. (2010). Development of forging process design to close internal voids. *Journal of Materials Processing Technology*, 210 (3), 415–422. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.09.022>
 3. Chen, K., Yang, Y., Shao, G., Liu, K. (2012). Strain function analysis method for void closure in the forging process of the large-sized steel ingot. *Computational Materials Science*, 51 (1), 72–77. doi: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.07.011>
 4. Lee, Y. S., Lee, S. U., Van Tyne, C. J., Joo, B. D., Moon, Y. H. (2011). Internal void closure during the forging of large cast ingots using a simulation approach. *Journal of Materials Processing Technology*, 211 (6), 1136–1145. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.01.017>
 5. Sang, B., Kang, X., Li, D. (2010). A novel technique for reducing macrosegregation in heavy steel ingots. *Journal of Materials Processing Technology*, 210 (4), 703–711. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.12.010>
 6. Erman, E., Medei, N. M., Roesch, A. R., Shah, D. C. (1989). Physical modeling of the upsetting process in open-die press forging. *Journal of Mechanical Working Technology*, 19 (2), 195–210. doi: [https://doi.org/10.1016/0378-3804\(89\)90004-1](https://doi.org/10.1016/0378-3804(89)90004-1)
 7. Kitamura, K., Terano, M. (2014). Determination of local properties of plastic anisotropy in thick plate by small-cube compression test for precise simulation of plate forging. *CIRP Annals*, 63 (1), 293–296. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.038>
 8. Mitani, Y., Mendoza, V., Osakada, K. (1991). Analysis of rotor shaft forging by rigid-plastic finite element method. *Journal of Materials Processing Technology*, 27 (1-3), 137–149. doi: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(91\)90049-k](https://doi.org/10.1016/0924-0136(91)90049-k)
 9. Zhang, Z. J., Dai, G. Z., Wu, S. N., Dong, L. X., Liu, L. L. (2009). Simulation of 42CrMo steel billet upsetting and its defects analyses during forming process based on the software DEFORM-3D. *Materials Science and Engineering: A*, 499 (1-2), 49–52. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.11.135>
 10. Vafaeesefat, A. (2011). Finite Element Simulation for Blank Shape Optimization in Sheet Metal Forming. *Materials and Manufacturing Processes*, 26 (1), 93–98. doi: <https://doi.org/10.1080/10426914.2010.498072>
 11. Liu, L., Liao, B., Li, D., Li, Q., Wang, Y., Yang, Q. (2011). Thermal–Elastic–Plastic Simulation of Internal Stress Fields of Quenched Steel 40Cr Cylindrical Specimens by FEM. *Materials and Manufacturing Processes*, 26 (5), 732–739. doi: <https://doi.org/10.1080/10426910903367428>
 12. Behrens, B.-A., Alasti, M., Bouguecha, A., Hadifi, T., Mielke, J., Schäfer, F. (2009). Numerical and experimental investigations on the extension of friction and heat transfer models for an improved simulation of hot forging processes. *International Journal of Material Forming*, 2 (S1), 121–124. doi: <https://doi.org/10.1007/s12289-009-0618-2>
 13. Just, H. (2006). Blick in das Innere eines Freiformschmiedeprozesses. *Stahl und Eisen*, 12, 70–72.
 14. Zhabankov, I. G., Markov, O. E., Perig, A. V. (2014). Rational parameters of profiled workpieces for an upsetting process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72 (5-8), 865–872. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5727-5>
 15. Markov, O. E. (2012). Forging of large pieces by tapered faces. *Steel in Translation*, 42 (12), 808–810. doi: <https://doi.org/10.3103/s0967091212120054>
 16. Markov, O. E., Perig, A. V., Markova, M. A., Zlygoriev, V. N. (2015). Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83 (9-12), 2159–2174. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8217-5>
 17. Markov, O. E., Perig, A. V., Zlygoriev, V. N., Markova, M. A., Grin, A. G. (2016). A new process for forging shafts with convex dies. Research into the stressed state. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90 (1-4), 801–818. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9378-6>
 18. Markov, O. E., Perig, A. V., Zlygoriev, V. N., Markova, M. A., Kosilov, M. S. (2017). Development of forging processes using intermediate workpiece profiling before drawing: research into strained state. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39 (11), 4649–4665. doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-017-0812-y>
 19. Markov, O. E., Oleshko, M. V., Mishina, V. I. (2011). Development of Energy-saving Technological Process of Shafts Forging Weighting More Than 100 Tons without Ingot Upsetting. *Metalurgical and Mining Industry*, 3 (7), 87–90. <http://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/87Markov.pdf>

Надійшла (received) 15.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Марков Олег Євгенійович (Марков Олег Евгеньевич, Markov Oleg Evgenijovich) – доктор технічних наук, професор, Донбаська державна машинобудівна академія, завідувач кафедри «Механіка пластичного формування»; м. Краматорськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9377-9866>; e-mail: oleg.markov.ond@gmail.com

Злигорев Віталій Миколайович (Злигорев Виталий Николаевич, Zlygoriev Vitalii Nikolayovich) – кандидат технічних наук, ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод», головний металург; м. Краматорськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5306-3812>; e-mail: zvn@nkmz.donetsk.ua

Герасименко Олексій Васильович (Герасименко Алексей Васильевич, Gerasimenko Oleksiy Vasiliyovich) – кандидат технічних наук, докторант, Донбаська державна машинобудівна академія, кафедра "Механіка пластичного формування" м. Краматорськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9895-2023>; e-mail: profalliance@i.ua

Алієва Лейла Ісрамотдінівна (Алиева Лейла Исрамотдиновна, Aliieva Leila Igramotdinovna) – доктор технічних наук, доцент, Донбаська державна машинобудівна академія, доцент кафедри «Механіка пластичного формування»; м. Краматорськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2275-5677>; e-mail: mto@dgma.donetsk.ua

Житніков Роман Юрійович (Житников Роман Юрьевич, Zhytnikov Roman Uriyovich) – аспірант, Донбаська державна машинобудівна академія, кафедра «Механіка пластичного формування»; м. Краматорськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0540-8465>; e-mail: romajitnikov2015@gmail.com

Інчаков Євген Володимирович (Инчаков Евгений Владимирович, Inchakov Yevgeniy Volodimirovich) – аспірант, Донбаська державна машинобудівна академія, кафедра «Механіка пластичного формування»; м. Краматорськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5324-7504>; e-mail: ye.geniy@gmail.com